

# Planificación de trayectorias bi-objetivo en robótica aérea para agricultura de precisión

D.Sanz, J.Del Cerro, J.Valente, M.Garzón, C.Rossi, A.Barrientos

**Abstract**—Este trabajo presenta las experiencias y resultados obtenidos al aplicar técnicas de planificación de trayectorias para vehículos aéreos no tripulados con el objetivo doble de tomar imágenes aéreas de alta resolución para realizar mosaicos de cultivos así como recoger los datos recopilados por motas o sistemas sensoriales inalámbricos con capacidad de crear y gestionar redes. Dichas redes son utilizadas para la monitorización y evaluación de tendencias en variables como la temperatura o humedad.

## I. INTRODUCCIÓN

AGRICULTURA DE PRECISIÓN o (AP) es el nombre bajo el que se recogen numerosas técnicas innovadoras aplicadas a la gestión de cultivos. La mejora de los rendimientos, la optimización en el uso de abonos y pesticidas además de la mejora del control sobre la calidad de las cosechas que se obtienen son las principales motivaciones que han llevado al sector agrícola a la aplicación de técnicas modernas como la Robótica o las comunicaciones inalámbricas en sus plantaciones. En el presente trabajo se unen dos de las técnicas más habitualmente usadas en AP como son la toma de imágenes aéreas y la monitorización mediante redes de sensores.

En el primer caso, la imagen aérea ha revolucionado los estudios sobre las plantaciones, permitiendo completos análisis sobre su nivel de estrés hídrico o la detección de malas hierbas entre otros. Actualmente las imágenes aéreas pueden obtenerse mediante satélites, que presentan el inconveniente de tener un costo elevado, una ventana temporal pequeña y una alta dependencia en las condiciones de visibilidad, una segunda alternativa son los aviones tripulados los cuales tienen también un coste alto debido a la escasa oferta en el mercado de compañías que

proporcionen dicho servicio, la tercera opción es el uso de vehículos aéreos no tripulados conocidos como UAVs, dotados en su mayoría de cámaras de alta resolución que, unido a la capacidad de realizar vuelos de forma segura a muy baja altura, se han convertido en la opción más razonable para obtener dichas imágenes.

Por otro lado, la monitorización de las condiciones ambientales y meteorológicas en el campo ha permitido obtener un mejor conocimiento del estado de la cosecha y por lo tanto, actuar de forma acorde a dicho estado. Para ello en los últimos años han proliferado el diseño de redes de sensores inalámbricos que registran de forma autónoma las variables a monitorizar, estos registros pueden transmitirse mediante módems GSM individuales o almacenarse en tarjetas de memoria que periódicamente son recogidas por los operarios de la finca. La dependencia de una adecuada cobertura en los campos en muchas ocasiones ha sido clave para impedir el uso de monitorización en tiempo real.

Sin embargo, los nuevos micro sistemas conocidos como motas presentan como principal ventaja un consumo muy reducido de energía y cierta capacidad de almacenamiento que permite guardar temporalmente los datos registrados para posteriormente ser volcados mediante un enlace de comunicaciones de bajo alcance. Se pueden encontrar numerosos trabajos en la bibliografía en que se detallan las capacidades de estos sistemas para auto configurarse en redes *mesh* [1], de forma que el volcado de la información no debe realizarse sensor a sensor sino mediante agrupaciones o conjuntos conocidos en la terminología sajona como *clusters* de sensores [2], [3].

El presente trabajo presenta el desarrollo de un planificador para un UAV con capacidad para realizar la fotografía aérea de forma estructurada y con los requisitos de resolución espacial y solapamiento impuestos por los usuarios encargados de realizar el tratamiento y posterior composición en mosaicos, y a la vez recoger la información de los *clústeres* de sensores ubicados en regiones definidas del campo, mediante la determinación de rutas óptimas.

## II. ESTADO DEL ARTE

Si bien existen numerosas publicaciones y realizaciones basadas en el uso de motas para la monitorización de grandes superficies [4], [5], no son tan frecuentes los estudios de planificación de trayectorias conocidas como Coverage Path Planning (CPP) aplicadas a vehículos aéreos. Por otro lado, el uso de vehículos aéreos para recoger datos de redes de sensores, si bien no es frecuente, tampoco presenta una novedad absoluta [6].

d.sanz, j.cerro, c.rossi, antonio.barrientos @upm.es, j.valente, m.garzon@etsii.upm.es

Este trabajo se ha realizado dentro del Grupo de Robótica y Cibernética, perteneciente al CAR UPM-CSIC, y ha sido financiado parcialmente por los proyectos 'ROBOCITY 2030' (S-0505\DP\000235) del Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica (PRICIT) de la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) y 'Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management', (RHEA) patrocinado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea (NMP-CP-IP 245986-2 RHEA). Los autores desean expresar su reconocimiento a los participantes en este proyecto: Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC (Centro de Automática y Robótica, Instituto de Ciencias Agrarias, Instituto de Agricultura Sostenible), CogVis GmbH, Forschungszentrum Telekommunikation Wien Ltd., Cyberbotics Ltd, Università di Pisa, Universidad Complutense de Madrid, Tropical, Soluciones Agrícolas de Precisión S.L., Universidad Politécnica de Madrid - UPM (ETS Ingenieros Agrónomos, ETS Ingenieros Industriales), AirRobot GmbH & Co. KG, Università degli Studi di Firenze, Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts -CEMAGREF, CNH Belgium NV, CNH France SA, Bluebotics S.A. y CM Srl.

En el trabajo que se presenta, se consideran como principales novedades el uso de vehículos con capacidades de vuelo estacionario y omnidireccional, que permiten establecer rutas óptimas para la realización de dos tareas simultáneas como son la toma de fotografía aérea y la recogida de datos desde *clústers*. Adicionalmente, la toma de fotografía de forma estática permite modificar los tiempos de exposición lo que permite trabajar bajo diferentes condiciones de luminosidad

En los últimos años, los investigadores en Agricultura de Precisión se han dado cuenta de que el empleo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) podría mejorar significativamente la investigación en ciencias agrícolas. Su motivación fue concebida por su disponibilidad, su montaje y mantenimiento sencillos, así como también por su bajo costo en comparación con las herramientas tradicionales (e.g. imágenes de satélite, vuelos tripulados) [7]. Por este motivo, se están realizando esfuerzos significativos para emplear una nueva generación de pequeños vehículos aéreos no tripulados (MUAV) en la teledetección.

Los UAV fueron utilizados por primera vez en agricultura durante los años 80s en Japón para la fumigación de cultivos [8]. Hoy su empleo es mayoritariamente para la adquisición de imágenes con el propósito de hacer mapas de los campos de cultivo a partir de técnicas de mosaico. Estos mapas son utilizados, junto con otras técnicas, para identificar brotes de malas hierbas en diversas plantaciones, encontrar irregularidades en sistema de fertilización, o hacer un análisis de madurez del cultivo [9], [10], [11].

También se han usado UAV en viñedos para la análisis de suelos, problemas de plagas, estudios de madurez de los frutos [12], y para monitorizar las temperaturas nocturnas para la prevención de heladas [13]. Otros autores también han presentado el desarrollo de plataformas aéreas dedicadas a la teledetección para el mapeo en ámbito general [14]. La construcción de mapas 3D georeferenciados empleando UAV han sido discutidas en [15], [16]. Por otra parte, teledetección cooperativa para la gestión del agua en tiempo real y control de riego con UAV son propuestos en [17].

### III. ARQUITECTURA

Como se ha expuesto anteriormente, el trabajo que se presenta tiene como objetivo la integración de diferentes técnicas de planificación, de tal forma que el resultado de la fusión brinde como resultado una planificación integrada que combine los objetivos de ambas misiones de manera óptima para el conjunto del sistema. De esta forma, es posible utilizar un recurso único en la consecución simultánea de dos objetivos diferentes.

Para ello, y siguiendo la secuencia temporal y su prioridad en el sistema, se ha implementado una arquitectura multinivel. Cada una de las capas de este sistema corresponde a un nivel de abstracción de la planificación final, de tal forma que el sistema se concreta como una planificación de trayectoria CPP (Nivel I) sobre la que se realiza una serie de modificaciones para que, respetando los objetivos de ésta, sea posible alcanzar los objetivos de la misión paralela.

La adaptación de la trayectoria la realiza un planificador de Nivel II, para unos puntos objetivo que han sido generados por un algoritmo de optimización intermedio.

De esta forma, teniendo como entradas la definición de un área de trabajo (coordenadas del campo, grado de solapamiento entre fotos) y el punto óptimo para la descarga de datos de un conjunto de nodos sensores agrupados en *clústers*, el flujo de trabajo es el siguiente: Utilizando las entradas mencionadas, el planificador de Nivel I (véase el subapartado III-A) genera la trayectoria óptima para que el *quadrotor* fotografíe el campo entero con el solapamiento especificado, evitando los obstáculos y ciñéndose al área especificada. Paralelamente, se ha obtenido para cada *cluster* -analizando el centro de masas del conjunto-, el punto en el que la descarga de datos es óptima para la red WSN en cuanto a tiempo se refiere. Con esta información, el segundo nivel de planificación, presentado en el subapartado III-B, calcula geoméricamente los puntos óptimos para realizar los enlaces, generando además los vectores de desviación necesarios en el caso de que la conexión no sea realizable desde la trayectoria original.

#### III-A. Planificación de Nivel I: Trayectoria para la toma de fotografías

Con el fin de obtener una colección de imágenes de la exploración de un área agrícola, un robot aéreo debe realizar una trayectoria discreta que cubra toda el área de interés. El problema de la cobertura total de una zona sujeta a limitaciones de la plataforma y del entorno es conocido como el problema de la planificación de ruta de cobertura (CPP).

El método utilizado en la descomposición del espacio de trabajo es por aproximación de retículas según la taxonomía propuesta en [18], lo que quiere decir que el espacio de trabajo se descompone en una cuadrícula regular. Este mapa de celdillas de la dispersión óptima se obtiene dividiendo el espacio de trabajo en cubos, donde el centro del cubo es el punto de interés. Se puede considerar esta como una tipo de cuadrícula de Sukharev [19].

Este tipo de descomposición asume que una vez que el robot está ubicado en el centro de la retícula, se considera que la celda queda cubierta por su actuador final (véase la Fig. 1).

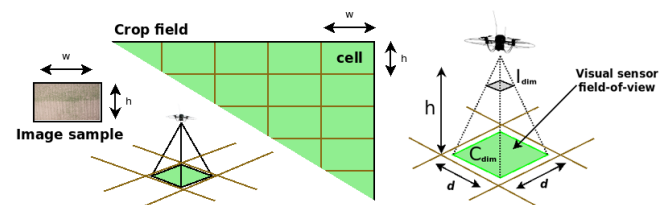


Fig. 1: Adquisición de datos en un espacio de trabajo basado en retículas.

De este modo, el centro de cada retícula es considerado un punto de paso, y cada retícula corresponde a una imagen. La dimensión de la retícula puede ser obtenida por la siguiente relación.

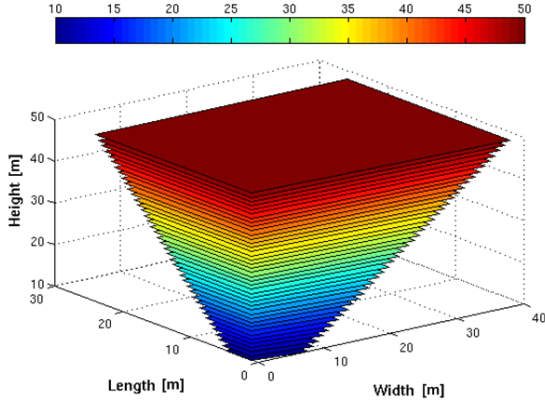


Fig. 2: Retículas con diferentes dimensiones según a la altura de vuelo

$$C_{dim}/h = I_{dim}/f \quad (1)$$

Donde  $C_{dim}$ ,  $h$ ,  $I_{dim}$ , y  $f$ , son respectivamente la dimensión de la retícula en metros, la altura de vuelo en relación al suelo, la dimensión de la imagen, y longitud focal de la cámara. Cabe recalcar que el robot aéreo debe volar a una altura constante respecto del suelo, de modo que asegure una determinada resolución espacial en la cuadrícula, y que el campo de visión del sensor sea suficiente para cubrir una retícula de una dimensión predefinida. La Fig.2 muestra la relación entre la dimensión de la retícula y la altura de vuelo del robot aéreo.

Otra ventaja de tener una descomposición de muestras de este tipo es que es posible obtener grafo unitario  $G < V, E >$  directamente, donde  $V$  son los vértices y  $E$  se corresponde con los bordes. Cada vértice representa un punto de paso y cada borde, la ruta entre dos puntos de paso  $u$  y  $v$  de modo a que  $u \sim v$ .

La ruta de cubrimiento aéreo se calcula estableciendo las siguientes restricciones: no pasar más de dos veces por el mismo punto de paso, respetar los puntos de partida y llegada predefinidos y realizar la trayectoria con el mínimo número de cambios de dirección posibles.

Para calcular la trayectoria se utiliza un algoritmo heurístico basado en la propagación de una onda [19]. Este algoritmo propaga una función de distancia a lo largo del espacio de trabajo desde un punto inicial hacia un punto final por todos los puntos libres del espacio de trabajo, siendo estos los asociados a todas las retículas consideradas puntos de paso y que no están ocupadas, así como aquellas definidas como puntos donde no es necesario obtener una muestra visual.

Una vez obtenida esta transformación, se sigue el gradiente de modo ascendente, a través de una búsqueda en profundidad limitada sujeta a una posición inicial y final predefinidas en el espacio de trabajo. Al usar este

procedimiento, la longitud de la búsqueda puede ser limitada por el número de vértices del grafo, de forma que la búsqueda no entra en ciclos infinitos, ni visita un nodo varias veces.

El coste de la ruta puede ser calculado basado en el número de cambios de dirección (rotaciones en guiñada). Utilizando una vecindad de 8 puntos de conectividad, el robot puede hacer giros de  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ , o  $\pm 135^\circ$  grados en el espacio de trabajo.

La función de coste que calcula el número de vueltas viene dada por,

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \gamma_k^{\{i\}}, \quad k \in \{135^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ\} \quad (2)$$

donde  $N$  es el número de vueltas,  $k$  el ángulo de rotación, y  $\Gamma k$  son constantes definidas, como  $\gamma_{\pm 135^\circ} > \gamma_{\pm 90^\circ} > \gamma_{\pm 45^\circ} > \gamma_{0^\circ}$

El objetivo final es encontrar una ruta de cubrimiento de área con el mínimo  $\Gamma$  sujeta a unas posiciones inicial y final (puntos de despegue y aterrizaje) predefinidas, tal y como se muestra en la Fig.3

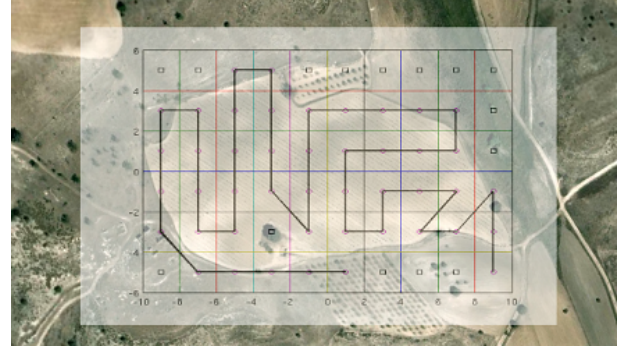


Fig. 3: Resultado final de la planificación CPP de Nivel I

### III-B. Planificación de Nivel II: Superposición de la misión secundaria

Como se ha mencionado anteriormente, el *quadrotor* dispone de un sistema de comunicaciones capaz de recoger los datos almacenados en un cluster, estableciendo una comunicación con alguno de los nodos sensores que lo componen. De esta forma, este segundo nivel de planificación genera, a partir del conjunto compuesto por la trayectoria planificada en la primera etapa y los puntos de recogida de datos, un conjunto de nuevas soluciones basadas en el plan original, que permite la recolección de datos a la vez que se desarrolla la misión de toma de fotos.

Así, este segundo nivel de planificación superpone la misión paralela manteniendo los objetivos de la primera. Para ello, el algoritmo obtiene los puntos óptimos para establecer la conexión con cada uno de los *clusters*, de manera que se optimice la recogida de datos en cada uno de ellos. Estos puntos pueden situarse sobre los segmentos que componen la trayectoria principal o en los puntos de toma de fotografías. En ambos casos, se configuran como nuevos puntos de paso

de la ruta, pudiendo tener paradas asociadas a cada una de ellos en función de las características del *cluster*.

Además, en el caso de que la trayectoria original no contuviese estos puntos <sup>1</sup>, el algoritmo de planificación es capaz de interpretar la situación y hallar los puntos hasta los que habría que desviarse respecto de la trayectoria original para poder establecer la comunicación, generando así un nuevo punto de paso que no estaba contenido en los segmentos previstos en el primer nivel.

En ambos casos (con desviación y sin ella), los puntos candidatos están sujetos a una serie de restricciones impuestas para el conjunto del sistema, que son:

- El alcance de las comunicaciones de los nodos sensores, 'A' (en metros): Las localizaciones generadas por el algoritmo del segundo nivel proporcionan la ubicación de la mota que se utilizará como *gateway*. Sin embargo, éste es capaz de transmitir dentro de un rango de distancias, de tal modo que el punto candidato debe estar contenido dentro de una esfera con centro en la mota y con radio el alcance de las comunicaciones de esta.
- La desviación máxima permitida (DevMax, en metros): Este factor limita, en el caso de que fuera necesario, la distancia que se puede desviar el vehículo aéreo respecto de la trayectoria original para alcanzar un punto de conexión con un *cluster*. De esta forma se consigue acotar el tiempo de desarrollo de la misión, garantizando así la disponibilidad de las baterías y por tanto la ejecución de la misión prioritaria.

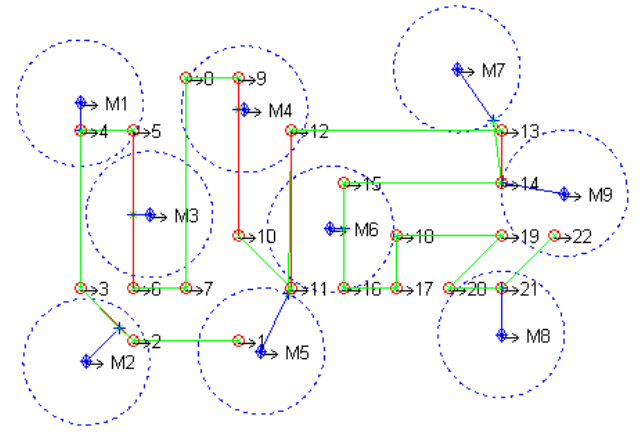
Aplicando estas condiciones, se obtienen mediante trigonometría los puntos candidatos para conectar con cada *cluster*, que posteriormente podrán ser considerados como punto óptimo. Los puntos posibles surgen al minimizar de las distancias (Dist) existentes entre la trayectoria principal y los puntos de recogida de datos (impuestos inicialmente), considerando además los propios *waypoints* de la ruta original (puntos de toma de fotografías). Estas distancias se pueden asimilar al enlace de comunicaciones, de tal forma que si  $Dist > A$  se requiere una corrección de la ruta en forma de desviación, lo que ocurrirá siempre que el *quadrotor* vuele a una altura superior al alcance de las comunicaciones.

Para ello, es necesario evaluar la bondad de cada uno los posibles candidatos, es por ello que surge la necesidad de un factor de mérito (M) con el que ponderar cada punto para poder compararlo con el resto, y que se concreta como:

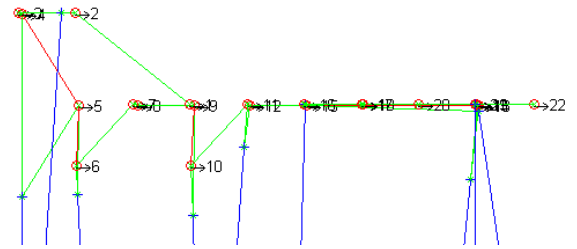
$$M_{ClusterN}(PuntoCandidato) = f(\gamma, Disp, Desp, \varphi\alpha) \ni (Desp < DevMax, Dist < A) = \gamma[(K_{Disp} * Disp_N * (PuntoCandidato) + K_{Desp} * Desp_N(PuntoCandidato) + K_{\varphi\varphi} * (PuntoCandidato) + K_{\alpha\alpha} * (PuntoCandidato, N)]$$

siendo:

<sup>1</sup>Aunque el algoritmo de planificación del nivel I cubre todo el área, lo hace únicamente a nivel visual, lo que no implica que la trayectoria generada contenga siempre los puntos óptimos para la recogida de datos.



(a) Vista cenital.



(b) Vista frontal: Perfil de altura.

Fig. 4: (a) Vista cenital. En rojo ruta original, en verde planificación modificada incluyendo los nuevos puntos de paso. Asteriscos azules muestran los puntos donde se va a realizar la descarga de información, representando en enlace con líneas azules que unen estos puntos con las correspondientes motas. (b) Vista frontal: Perfil en altura.

- Categoría del punto ( $\gamma$ ): Este factor pondera el punto según la manera en la que afecte al sistema. De esta forma, no se evalúan igual la adquisición de datos en un punto de toma de fotografía -donde era necesario pararse de por sí- o en un punto desviado respecto de la trayectoria original, al implicar éste un aumento en el tiempo, longitud y consumo energético de la misión.
- Desplazamiento necesario para alcanzar el punto (Desp): En el caso de que exista una desviación respecto de la trayectoria original, se ponderará esta según su magnitud.
- Distancia al nodo utilizado como gateway (Dist). Esta distancia -estimada mediante la adaptación de la señal RSSI (Received Signal Strength Indicator) asociada a cada transmisión-, es relevante desde el punto de vista de fiabilidad de las comunicaciones, ya que, al estar relacionada la distancia entre emisor y receptor con la potencia de recepción, esta distancia está a su vez asociada a la tasa de fallos en el envío.
- Índice de conectividad del nodo móvil con varios nodos de un cluster ( $\varphi$ ). Al ser *ZigBee* un protocolo de transmisión semiduplex, el canal de comunicaciones



es común para todos. De esta forma, cuando varias motas se encuentran conectadas entre ellas (dentro de un área de comunicación común), solo puede transmitir una de ellas, quedando el resto a la espera. Por ello, para ponderar el efecto que tiene en la saturación de un área de comunicaciones el nodo móvil, se tiene en cuenta el número de enlaces simultáneos que establece el *quadrotor* en una comunicación broadcast.

- Ángulo de ataque ( $\alpha$ ), en radianes. Este parámetro representa el ángulo del vector de desviación con respecto a la trayectoria original (únicamente en las situaciones en las que el *quadrotor* tenga que desplazarse fuera de la ruta principal). Este factor se debe considerar ya que cuando mayor sea el ángulo, más abrupto y peligroso será el cambio en el *quadrotor*.

Sin embargo, la evaluación de los puntos no es directa, si no que se realiza en un proceso recursivo en el que se diferencian tres fases:

En la primera de ellas, se ponderan los puntos sobre el plano  $XY$ , sobre el que se encuentran los *clusters* sensores, como primer filtro para descartar fácilmente puntos que no cumplan con los requisitos. Posteriormente, se evalúa la proyección tridimensional de estos puntos, considerando el perfil de vuelo del *quadrotor* (véase Fig.4). Finalmente, se eligen los puntos con menor factor  $M$  de manera recursiva, ya que se va reajustando el factor de mérito de acuerdo con los puntos anteriormente elegidos, junto el índice de conectividad con varios nodos a fin de evitar problemas de interferencias en la recepción.

El resultado final del proceso de planificación es el que se muestra en la Fig.5. Como se puede apreciar, sobre la trayectoria original se superpone en verde la nueva

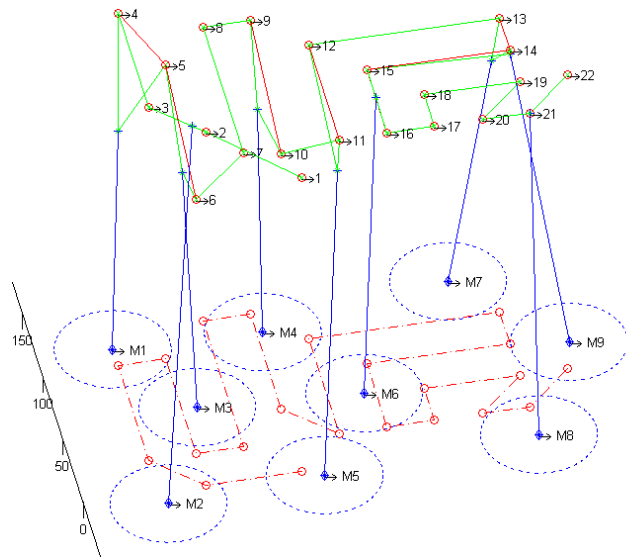


Fig. 5: Vista isométrica. (La leyenda utilizada es la misma que en la Fig.4).

trayectoria generada por el planificador de segundo nivel, compuesta por los puntos de paso originales y los nuevos correspondientes a las desviaciones, unidos a las motas que actúan como *gateways* representando los enlaces de comunicaciones. Esta información es generada en forma de *waypoints* relativos al sistema de coordenadas propio del planificador, de tal forma que en el último paso se realiza una transformación de los ejes, de tal forma que los puntos de paso generados se concreten en localizaciones georeferenciadas, que son transmitidas al *quadrotor* para que este ejecute la misión.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se describe al final del subapartado anterior, el nuevo plan generado por el algoritmo bi-objetivo se transmite al *quadrotor*, que ejecuta la misión siguiendo los *waypoints* transmitidos. Como puede apreciar en la Fig.6, el seguimiento y precisión de la ruta durante las pruebas realizadas han sido satisfactorios, pudiendo además comprobarse la conectividad con las motas referenciadas en el entorno.

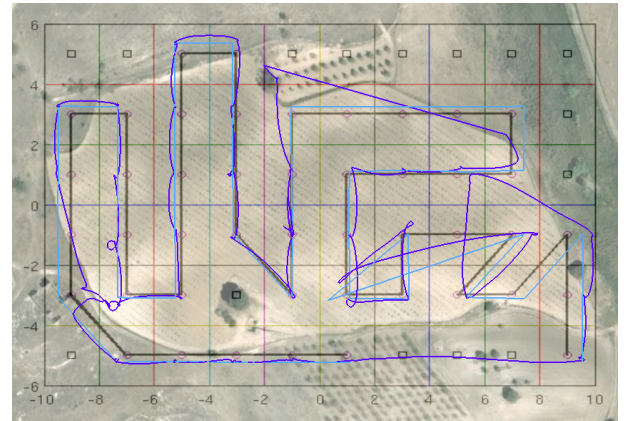


Fig. 6: Resultados de una prueba de campo. Vista cenital del trayecto recorrido por el *quadrotor*.

Adicionalmente, las pruebas han permitido verificar que el sistema tiene un comportamiento óptimo y comparar los resultados teóricos y experimentales. Como consecuencia de la superposición de la segunda misión, se ha producido un incremento medio en la distancia de las rutas de 16.9m, lo que supone una variación relativa 1.6%. También se ha obtenido el valor medio para la altura de vuelo (incluyendo los desvíos), situado en 14.8m cuando la referencia general es de  $15m \pm 3m$ . Así mismo, se ha comprobado que fijando el alcance máximo en 25m, la mayor altura alcanzada ha sido de 18m, mientras que la mínima ha sido 11.4m, lo cual verifica que el robot aéreo tiende a mantener la altitud y a minimizar las translaciones, puesto que se observan los descensos pertinentes para el cumplimiento de la misión pero no se detectan elevaciones innecesarias. La variación máxima de altitud supone un 24%.

Finalmente, se ha analizado los factores relacionados con la obtención de los puntos candidatos para la descarga

de información, obteniéndose una media de  $3.851 \simeq 4$  localizaciones por cada *cluster*, con un factor de mérito medio para los puntos definitivos de acceso de 7.0767.

## V. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de planificación multinivel y bi-objetivo, capaz de generar una solución para dos misiones independientes, simultaneas en el tiempo y paralelas en el espacio, y que comparten un recurso único (un vehículo aéreo). El planificador garantiza el cumplimiento de unos objetivos mínimos (pasar por unos puntos de paso concretos) de ellas sujeto a las restricciones impuestas al sistema, de tal forma que se minimice el tiempo de vuelo del *quadrotor* y se maximice la efectividad del sistema en términos de ahorro energético.

## REFERENCIAS

- [1] D. Puccinelli and M. Haenggi, "Arbutus: Network-layer load balancing for wireless sensor networks," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 2063–2068.
- [2] A. Abbasi and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 30, no. 14–15, pp. 2826–2841, 2007, network Coverage and Routing Schemes for Wireless Sensor Networks. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366407002162>
- [3] X. Shu-ming, W. Liang-min, Q. Xiao-qian, and Z. Yong-zhao, "Application research of wsn in precise agriculture irrigation," in *Environmental Science and Information Application Technology, 2009. ESIAT 2009. International Conference on*, vol. 2, 2009, pp. 297–300.
- [4] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks," in *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, ser. MobiCom '02. New York, NY, USA: ACM, 2002, pp. 148–159. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/570645.570664>
- [5] R. Szwedczyk, A. Mainwaring, J. Polastre, J. Anderson, and D. Culler, "An analysis of a large scale habitat monitoring application," in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 214–226. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1031495.1031521>
- [6] I. Maza and A. Ollero, "Multiple uav cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms," in *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, R. Alami, R. Chatila, and H. Asama, Eds. Springer Japan, 2007, pp. 221–230.
- [7] P. Zarco-Tejada, J. Berni, L. Suarez, and E. Fereres, "A new era in remote sensing of crops with unmanned robots," *SPIE Newsroom*, 2008.
- [8] Y. Inc. (2011, Jan.) Yamaha autonomous-flight unmanned helicopter deployed for observation illegal dumping around mt. fuji. [Online]. Available: <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2002/02/06/sky.html>
- [9] F. Lopez-Granados, "Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches," *Weed Research*, vol. 51, no. 1, pp. 1–11, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00829.x>
- [10] S. Herwitz, S. Dunagan, D. Sullivan, R. Higgins, L. Johnson, J. Zheng, R. Slye, J. Brass, J. Leung, B. Gallmeyer, and M. Aoyagi, "Solar-powered uav mission for agricultural decision support," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, vol. 3, 2003, pp. 1692–1694.
- [11] S. Herwitz, L. Johnson, S. Dunagan, R. Higgins, D. Sullivan, J. Zheng, B. Lobitz, J. Leung, B. Gallmeyer, M. Aoyagi, et al., "Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 44, no. 1, pp. 49–61, 2004.
- [12] L. Johnson, S. Herwitz, S. Dunagan, B. Lobitz, D. Sullivan, and R. Slye, "Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV," in *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2003.
- [13] S. Herwitz, K. Allmendinger, R. Slye, S. Dunagan, B. Lobitz, L. Johnson, and J. Brass, "Nighttime uav vineyard mission: Challenges of see-and-avoid in the nas," in *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit*, 2004, pp. 1–5.
- [14] R. Sugiura, N. Noguchi, and K. Ishii, "Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter," *Biosystems Engineering*, vol. 90, no. 4, pp. 369–379, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WXXV-4FPX2RR-1/2/fece88cbdb7ce8055db0fd7fd5733694>
- [15] T. Iwahori, N. Noguchi, K. Ishii, and R. Sugiura, "Development of gis map generation system using an unmanned helicopter," Tech. Rep., 2005.
- [16] F. Rovira-Más, Q. Zhang, and J. Reid, "Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoisimages," *Biosystems Engineering*, vol. 90, no. 3, pp. 251–259, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WXXV-4FFN4P6-4/2/3a6c2ab3e7017e414260b20cbb9b816c>
- [17] H. Chao, M. Baumann, A. Jensen, Y. Chen, Y. Cao, W. Ren, and M. McKee, "Band-reconfigurable multi-uav-based cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control," in *Proc. of the IFAC World Congress, Seoul, Korea*, 2008. [Online]. Available: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/37674.html>
- [18] H. Choset, "Coverage for robotics - a survey of recent results," *Ann. Math. Artif. Intell.*, vol. 31, no. 1–4, pp. 113–126, 2001.
- [19] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006.